

电子测量技术基础

金绍黑 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书着重讲述了电子测量技术的基本概念、原理和实际应用。除重点讲述电压、时间-频率与相位、阻抗等参数的测量外，对用示波器的测量、信号特性测量和微波测量也作了适当的介绍。最后一章简要介绍了电子测量的自动化及发展趋势。

本书力求简明扼要、通俗易懂，尽量避免烦琐的数学推导，可供从事电子测量的技术人员阅读参考，也可作为中等专业学校有关专业的教学参考资料。

电子测量技术基础

金绍黑 编著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1986年8月第一版
印张：12 8/32 页数：196 1986年8月河北第一次印刷
字数：320 千字 印数：1—8,000册

统一书号：15045·总3179—有5456

定价：2.85元

目 录

第一章 电压测量	(1)
§ 1-1 概述	(1)
§ 1-2 模拟式电压表的工作原理	(3)
一、直流放大式	(4)
二、检波—放大式	(4)
三、放大—检波式	(5)
四、外差式	(6)
五、热偶变换式	(7)
六、测热电阻电桥法	(11)
§ 1-3 数字式电压表的工作原理	(12)
一、数字式电压表的分类	(12)
二、数字电压表的基本原理	(13)
三、数字电压表的主要工作特性	(14)
四、时间编码数字电压表	(17)
五、逐次比较反馈编码数字电压表	(19)
六、双斜式积分型数字电压表	(27)
§ 1-4 交流电压波形的标记	(32)
§ 1-5 电压表中的检波器及其波形误差	(37)
一、峰值检波器	(37)
二、平均值检波器	(55)
三、有效值检波器	(61)
四、同步检波器	(66)
五、检波器的波形误差	(69)

§ 1-6	脉冲电压测量	(79)
§ 1-7	电压测量的新发展	(85)
	一、抽样电压表	(85)
	二、电压表的自动化与“智能化”	(86)
§ 1-8	本章小结	(86)
	思考题和习题	(87)
第二章	时间-频率和相位测量	(91)
§ 2-1	概述	(91)
§ 2-2	模拟法频率测量	(95)
	一、谐振法测频	(96)
	二、电桥法测频	(99)
	三、用比较法测量频率	(100)
§ 2-3	计数法频率测量	(105)
	一、电子计数器的基本工作原理	(106)
	二、通用电子计数器的误差分析	(110)
	三、提高电子计数器测频精度的典型技术	(114)
§ 2-4	数字相位计相位差测量	(116)
	一、数字相位计的基本工作原理	(117)
	二、数字相位计的误差	(121)
	三、BX-14型数字相位差计	(125)
§ 2-5	现代时间频率标准	(127)
§ 2-6	频率的精密测量	(132)
	一、概述	(132)
	二、若干基本概念	(132)
	三、频稳的时域测量技术	(139)
	四、频稳的频域测量技术	(144)
§ 2-7	本章小结	(146)
	思考题和习题	(147)
第三章	集中参数阻抗测量	(149)

§ 3-1	概述	(149)
§ 3-2	模拟法阻抗测量	(153)
	一、利用电压电流法测量阻抗	(153)
	二、利用电桥法测量阻抗	(155)
	三、利用谐振法测量阻抗	(169)
§ 3-3	数字化阻抗测量	(183)
	一、 L 、 R 、 C 数字式测量仪	(183)
	二、数字式 Q 表	(191)
§ 3-4	利用变换器测量阻抗	(194)
	一、电阻 \rightleftharpoons 电压变换器法	(194)
	二、电容 \rightleftharpoons 电压变换器法	(195)
	三、电感 \rightleftharpoons 电压变换器法	(196)
§ 3-5	非电量的电测法	(197)
	一、非电量的电测原理	(198)
	二、传感器	(199)
§ 3-6	本章小结	(203)
	思考题和习题	(203)
第四章	用示波器的测量	(206)
§ 4-1	概述	(206)
§ 4-2	电子示波器波形显示的基本原理	(207)
	一、示波器的基本组成	(207)
	二、示波管	(208)
	三、示波器波形显示的基本原理	(214)
	四、示波器的基本电路	(217)
	五、脉冲的单踪显示	(220)
	六、双通道显示	(222)
	七、双自动交替扫描	(224)
§ 4-3	示波器的基本测量方法	(224)
	一、电压的测量	(224)

二、时间的测量	(228)
三、相位的测量	(231)
四、李沙育图形法	(235)
§ 4-4 示波器在测量技术中的应用	(239)
一、调制波的测量	(240)
二、方波测试	(243)
三、显示晶体管特性曲线	(244)
四、检验放大器和放大电路	(245)
五、示波器在非电量测量中的应用	(246)
§ 4-5 取样示波器的基本工作原理	(248)
§ 4-6 电子示波器测量的新发展	(252)
§ 4-7 本章小结	(254)
思考题和习题	(255)
第五章 信号特性测量	(256)
§ 5-1 信号频谱	(256)
一、频谱的概念	(256)
二、周期信号的频谱	(257)
三、非周期信号的频谱	(265)
§ 5-2 频谱分析仪	(266)
一、波形分析仪	(266)
二、频谱分析仪	(267)
§ 5-3 调制信号的测量	(273)
一、调幅系数的双重检波法测量	(273)
二、测量频偏的几种方法	(274)
§ 5-4 扫频测量	(280)
一、扫频信号发生器的工作原理	(280)
二、测量原理及工作特性	(281)
三、扫频振荡器的扫频原理	(283)
§ 5-5 失真度的测量	(291)

一、基波抑制法	(291)
二、交互调制法	(301)
三、白噪声法(动态法)	(305)
§ 5-6 本章小结	(306)
第六章 微波测量	(308)
§ 6-1 概述	(308)
§ 6-2 功率测量	(312)
一、热量计式大功率计	(314)
二、热电偶式中、小功率计	(316)
三、晶体管检波式小功率计	(318)
§ 6-3 频率测量	(321)
一、谐振式频率计	(321)
二、外差式频率计基本原理	(326)
三、频率转换式计数器频率计	(327)
§ 6-4 驻波测量	(331)
一、驻波测量线	(331)
二、驻波测量	(333)
三、极大和极小驻波比测量	(334)
四、误差分析	(338)
§ 6-5 反射计法测量	(339)
一、双定向耦合器式反射计	(339)
二、单定向耦合器式反射计	(340)
三、扫频反射计	(341)
§ 6-6 相位测量	(344)
一、电桥比较法	(345)
二、锁相变频法	(346)
§ 6-7 网络参数的测量	(347)
一、“三点法”测量	(348)

二、幅—相比较法·····	(350)
三、自动网络分析仪·····	(352)
四、六端口技术·····	(354)
§ 6-8 衰减量的测量·····	(355)
一、功率比法·····	(355)
二、替代法·····	(357)
§ 6-9 本章小结·····	(360)
第七章 测量系统与测量自动化的新发展 ·····	(361)
§ 7-1 概述·····	(361)
§ 7-2 测量系统的组成与分类·····	(363)
§ 7-3 电子测量的自动化与发展·····	(369)
一、自动测试系统·····	(369)
二、自动测试仪器·····	(373)
三、电子测量自动化的发展趋势·····	(374)

第一章 电压测量

§1-1 概 述

在电子测量技术里，电压是最重要的基本参量之一。许多电参量可视为电压的派生量，或以电压的形式反映出来，或者表现为电压的量。因此电压测量是许多电参量测量的基础。比如，电子设备的灵敏度、频率特性、选择性、增益、衰减、相位移、调制度、失真度、效率以及噪声系数等可视为电压的派生量；各种电路的工作状态，如谐振、平衡、差拍、饱和、截止以及工作点的动态范围等，通常都是以电压的形式反映出来；而电子设备的控制信号、反馈信号、告警信号以及其它信息，主要表现为电压的量。不少电子测量仪器（如信号发生器、Q表、阻抗电桥、调制度表、失真度仪……）都用电压表作为它的指示装置、辅助的监测装置。至于进行电子设备的调试和完成一般的测量任务，电压表几乎是必不可少的工具。

在电子测量技术中，电压测量有如下特点：

1. 频率范围广

目前，电压测量的频率范围大约从 0.00001Hz 一直到几吉赫（ 10^9Hz ）。近年来，随着超小型同轴电缆的研究成功，电压测量的频率上限已推进到 36GHz 。

2. 电压范围宽

通常，被测电压的上限大约在 1kV 左右，少数达到几十、几百 kV 以上（如测示波管、显象管的直流供电电压等）；其下限一般

在零点儿微伏 ($10^{-7}V$) 至几个毫伏。随着科学技术的发展, 目前已出现灵敏度达 $10^{-9}V$ 的数字式电压表。由于超导器件的出现, 电压测量已能测出 $10^{-12}V$ 的电压 (理论上可达 $2.07 \times 10^{-17}V$)。

3. 要求很高的输入阻抗

为了在测量电压时, 使被测电路的工作状态不致受到影响, 要求电压表的输入阻抗尽可能地高, 即输入电阻尽量大, 输入电容应尽量小。由于输入电容主要受电路结构的限制, 一般可做到 $1 \sim 10pF$ 左右。

为了避免电压表接入时引起被测电路中的不良反射, 在高频时, 往往还要考虑阻抗匹配问题, 被测对象为一谐振电路时, 则还要考虑输入电容的影响。

4. 要求有足够高的测量精度

由于电压值的基准是直流标准电池, 在直流测量中, 各种分布参数的影响可不予考虑, 故直流电压测量的精度是最高的。目前, 利用数字电压表很容易使测量精度达到 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ 甚至更高。

交流电压的测量误差, 随着不同的频率和不同的电压数值, 有较大的差异, 一般在 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 范围内。

5. 被测交流电压的波形多种多样

在电子技术中, 除了测量纯正弦电压外, 还需要测量各种失真的正弦电压与各种非正弦电压 (包括脉冲电压)。所以, 在考虑测量方案及相应的测量仪器时, 应仔细研究由于波形偏离正弦波所带来的各种新问题。

6. 对电压表的多功能化、数字化、自动化等的要求越来越高

由于电压测量的广泛性及重要性, 通常要求一台电压表不仅能测量电压, 而且能通过适当的变换器或插件能测量其它参量 (即把

其它参量变为电压来测量)；同时，为了提高测量精度和实现自动测量、自动控制、自动进行测量数据处理等。对测量仪器的数字化、自动化、智能化等的要求也十分迫切，其发展速度也非常快。

随着整个电子测量仪器的发展，目前电压表也在向着宽频段、高灵敏度、高精度、数字化、自动化等方向发展。

图1-1示出了几种有代表性的被测电压波形图。

本章着重介绍交流电压表中，各种模式电压测量技术典型方案的原理、误差分析、发展动态以及某些应用举例等。

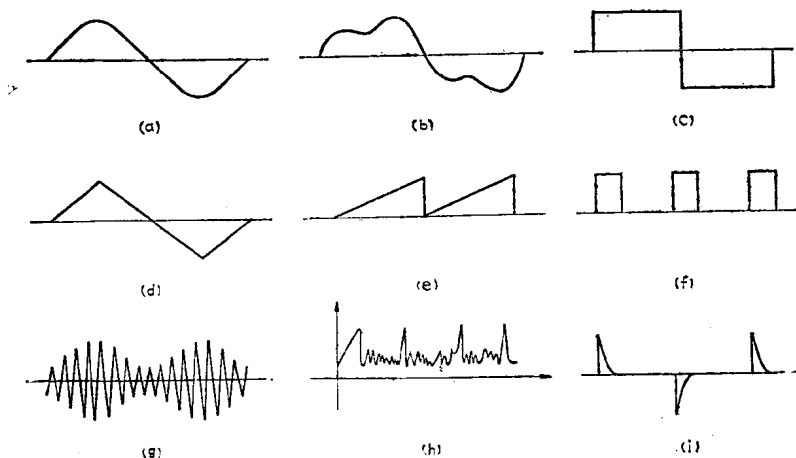


图 1-1 几种有代表性的被测电压波形图。

§ 1-2 模拟式电压表的工作原理

电压测量的方案，以及相应的仪器类型很多。从大的来分，电压测量可分为模拟式及数字式两种类型。

模拟式电压表中，最常见的是用磁电式电流表作为指示器。这时由于它具有灵敏度高（最小量程达 $10\sim 25\mu\text{A}$ ）、准确度高（ 0.1% ）、刻度线性、受外磁场及温度的影响小等突出的优点。但磁电式电流表只能测量直流电流，而且其灵敏度还远远不能适应电

电子技术中对高输入阻抗及微弱电压测量的要求。例如，测 $1mV$ 的电压时，如要求输入电阻 $10M\Omega$ ，则磁电式电流表的电流 $I = 10^{-7} \sim 10^{-10}A$ 。因此，必须通过各种形式的电子变换器，把被测量的交流信号变换成直流信号，把高输入阻抗的微弱电压变换成能够用一般磁电式电流表进行测量的低输出阻抗的电流。为了满足不同的测量对象，以及不同的测量目的的要求，电子电压表又可分为多种类型，本节只介绍比较典型的几种方式。

一、直流放大式

在磁电式电流表前面，加上一直流放大器就构成了一个能测量微小电压(及微小电流)的高灵敏度直流电压(电流)表，如图1-2所示。

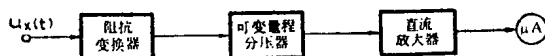


图 1-2 直流放大式电压表原理方框图

图中分压器作为变换量程用，直流放大器担负着对被测的微弱电压进行放大和实现高输入阻抗、低输出阻抗的变换任务。

对直流放大器来说，它的关键问题是减小噪声和漂移，这一点对电压表来说尤其突出。所以，在大多数情况下，图1-2都不做成专用直流电压表，而且是与各种检波器配合作成高灵敏度交流电压表。

二、检波—放大式

为了克服图1-2的直流放大器的缺陷，再在前面加上检波器，这就构成了检波—放大式电压表，如图1-3所示。

这种方案由于先检波后放大，故频率范围、输入阻抗等都主要地取决于检波器。采用特殊的超高频检波二极管，并在结构工艺上作仔细考虑，这种形式的电压表，频率范围可以作得很宽，例如，

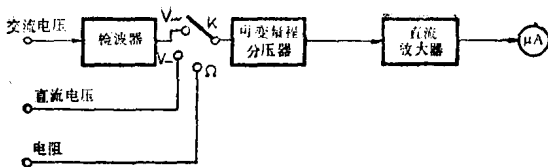


图 1-3 检波—放大式电子电压表原理方框图

从20Hz到1GHz以上。故有“高频电压表”或“超高频电压表”之称。

检波——放大式电压表，当用真空二极管作检波器时，由于小信号下检波效率很低，造成表头的起始部分刻度的非线性十分严重。用超高频晶体二极管作检波器时，虽可提高小信号的检波效率，但灵敏度的进一步提高却在很大程度上受到后级直流放大器噪声和零点漂移的限制。早期生产的检波——放大式电压表，其放大器多采用桥式电路，电压表的最小量程一般均在1V以上。

用调制型直流放大器可以很好地解决增益与零点漂移的矛盾，噪声也可降到很低。这样构成的检波——放大式电压表其灵敏度已与放大——检波式接近。例如，国产DA-1型超高频电压表频率范围从10kHz到1000MHz。最小量程为3mV，电压表的灵敏度可以作到几个 μV 。

这种电压表的输入阻抗一般可以做得很高。

三、放大—检波式

把被测交流电压先经过交流放大器进行放大，然后再加到检波器上，便构成了放大——检波式电压表，如图1-4所示。

这种方法由于采用了交流放大器预先进行放大，故可避免因检

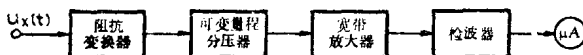


图 1-4 放大—检波式电压表原理方框图

波器工作于弱信号下而使刻度呈现严重的非线性。同时，由交流放大器来提高灵敏度也不存在象直流放大器那样的漂移问题。但是，这种类型的电压表要工作于很宽的频率范围，就必然与灵敏度发生矛盾。在设计放大器时，只能根据测量目的加以折衷，并且有所侧重。一般的放大——检波式电压表频率低端可以作到20Hz，甚至2Hz，而频率高端可达1MHz，有的可达5~10MHz。电压测量的灵敏度则在几十~几百 μV 左右，灵敏度的进一步提高，除必然造成频带变窄外，还最终受到前级噪声电平的限制。

属于这种类型的电压表，如国产DA-16型晶体管毫伏表，频率范围为20Hz~1MHz，最小量程为1mV，又例DA-12型晶体管视频毫伏表，频率范围为30Hz~10MHz，最小量程为1mV等。

四、外差式

早期生产的检波——放大式电压表，可用来测量高频（约几百兆赫）较大的电压（约0.1V以上）；而放大——检波式电压表，可用来测量低频（1MHz以下），或视频（10MHz以下）的小电压（毫伏级）。近年来，检波——放大式电压表的灵敏度已推进到毫伏级，甚至微伏级，但由于非线性等原因，测量精度不高。对于放大——检波式电压表，由于放大器增益和带宽的矛盾，很难把频率上限提得很高。另外，上述两种型式的电压表，在提高灵敏度的同时，都会遇到噪声或干扰问题。

由于噪声的频谱很宽，而被测的正弦电压却是单频的。因此，为了克服噪声影响而提高测量灵敏度，其有效措施是使电压表在一定的高频范围内，具有尖锐的频率选择性，以便把各种不同频率的电压变成频率固定的视频或中频电压。固定频率的视频或中频放大器，其稳定的增益可以作得很高，噪声也小得多。外差法解决了交流放大器灵敏度和带宽矛盾，利用外差法原理作成的电压表如图1-5所示。

一部外差式电压表（又称测量接收机），由于它要以足够高的

精度对高频电压进行定量的测量，因此在各方面的要求要比一部收音机高得多，结构也要复杂得多。而且还必须以一定的精度对刻度进行校准。

这种方案中，由于主放大器是工作于固定中频的选频放大器，故可大大削弱前级变频噪声等的影响而把增益作得很高。有的外差式电压表甚至还用两次变频，这种电压表的灵敏度一般都在微伏量级，而频率范围由于用变频的方法，故可以从100kHz左右一直工作到几百MHz以上，故有时又称为“高频微伏表”。

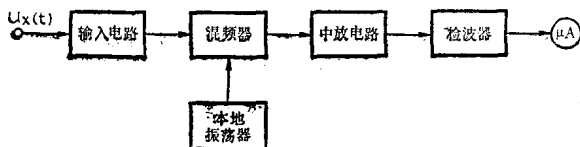


图 1-5 外差式电压表原理方框图

图1-5中，输入级一般是阴极（或射极）输出器。常见的外差式电压表，如国产DW-1型电压表，其频率范围从100kHz到300MHz，共分8个波段；最小量程为 $15\mu\text{V}$ ，最大量程为 15mV （加衰减器可扩展至 1.5V ）；基本误差为 $\pm 3\%$ （ $15\mu\text{V}$ 档，附加误差为 $\pm 2\%$ ）。该仪器还可测量 $0\sim 80\%$ 的调制度（误差为 $\pm 5\%$ ）和 $0\sim 80\text{kHz}$ 的频偏（误差为 $\pm 5\%$ ）。

五、热偶变换式

在对未知波形或复杂波形电压的测量中，特别是噪声电压的测量、失真度的测量以及在频谱纯度的研究等技术中，都要求能测出电压的真正有效值。热偶元件便可以比较理想地把交流电压的有效值变换成直流电流来进行测量。

热偶又称为热电偶，是由两种不同材料的导体所构成的具有热电现象的元件。例如，把一个铁的和—个康铜的导体，如图1-6(a)那样连接起来，那么在A、B两个接触端面，由于两种金属表面电

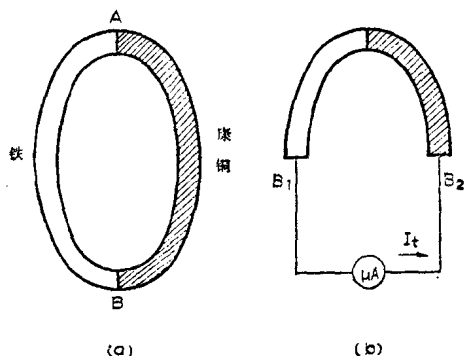


图 1-6 热电偶现象

子的逸出功不相等，故交界面上将形成电位差。如果 A 、 B 两端面的温度相等，则该二接触电位差彼此互相抵消。如果其中一个端面（例如 A 点）的温度升高，则二端面的接触电位差便不相等，如果象图 1-6(b) 那样，安一只高灵敏度微安表，就会读出一个直流电流，这时便构成一只热偶电路。电流的大小决定于两材料的性质和它们的温差等。一般在热端（即 A 端）处于最高允许温度时，大约冷热两端每 1°C 温差，可产生十几到几十 mV 的热电势，并形成约几十 μA 的电流（并称为热电偶的灵敏度）。

设热偶电流为

$$I = \frac{e}{R + R_A} \quad (1-1)$$

式中： e ——热电动势，其值与图中 A 、 B 两端的温度和导体的材料有关

R ——两热偶的串联直流电阻

R_A ——微安表内阻

如果造成 A 点温度上升的原因恰好就是由于被测电压发热所致，则式(1-1)中热电动势 e 及流过微安表的电流 I ，使其与该热量或温升成正比，也就是与被测电压有效值平方成正比。这样，便完

成了从被测交流电压的有效值到热偶回路的直流电流之间的变换。

热偶的突出优点是微安表的指示值与被测交流电压的有效值成比例，而与波形无关，故可以作成比较理想的有效值电压表。其不足之处是，当直接应用时，刻度为非线性，且容易因过荷而烧毁以及灵敏度不太高，因此一直未能被广泛采用。然而，热偶式电压表却具有有效值检波器所无法胜任的优点，这就促使人们去不断地克服它的缺点，使其性能不断完善。

图1-7示出的是利用热电偶作成的DA-24型热偶式电压表的原理方框图。它是一种具有线性刻度，且输入阻抗高，有足够的灵敏度、频率范围及测量精确度。图中的测量热偶4TC1及平衡热偶4TC2已预先挑选配对，性能基本相同。在结构上也使之处于同样的环境温度中。

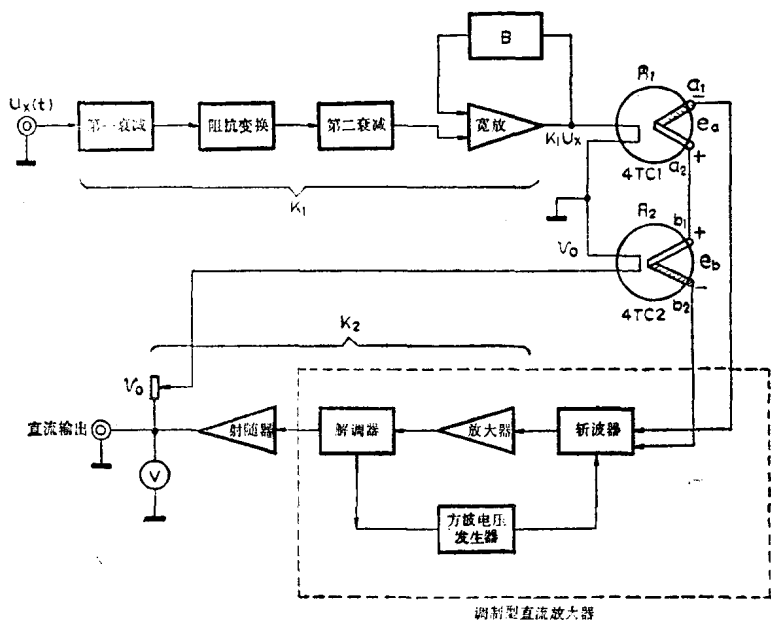


图 1-7 DA-24型热偶式电压表方框图